



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KARAKTERISTIK FENOMENA *PRE-BREAKDOWN*
VOLTAGE BERBASIS PENGUJIAN PADA MEDIA ISOLASI
MINYAK**

Dwi Krisna Cahyaningrum
NRP 2212100018

Dosen Pembimbing
Dr. Eng I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Danar Fahmi, S.T, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS OF CHARACTERISTIC PRE-BREAKDOWN
VOLTAGE PHENOMENON BASED EXPERIMENT ON OIL
INSULATION**

Dwi Krisna Cahyaningrum
NRP 2212100018

Advisor
Dr. Eng I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Danlar Fahmi, S.T, M.T.

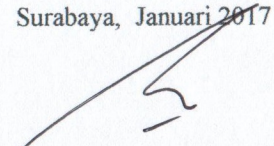
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Analisis Karakteristik Fenomena *Pre-Breakdwon Voltage* Berbasis Pengujian pada Media Isolasi Minyak**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017



Dwi Krisna Cahyaningrum
NRP. 2212100018

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISIS KARAKTERISTIK FENOMENA
PRE-BREAKDOWN VOLTAGE BERBASIS
PENGUJIAN PADA MEDIA ISOLASI MINYAK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

NIP 1970 07 12 1998 02 1 001

Danar Fahmi, S.T., M.T.

NIP 1989 09 25 2014 04 1 002

**SURABAYA,
JANUARI, 2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS KARAKTERISTIK FENOMENA *PRE-BREAKDOWN VOLTAGE* BERBASIS PENGUJIAN PADA ISOLASI MINYAK

Nama : Dwi Krisna Cahyaningrum
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Fenomena *pre-breakdown voltage* merupakan suatu fenomena kegagalan dielektrik pada media isolasi. Fenomena ini dapat mempengaruhi kinerja suatu media isolasi. Semakin cepat suatu media isolasi mengalami fenomena *pre-breakdown voltage* maka kekuatan dielektrik media isolasi tersebut mengalami penurunan. Dalam pengujian ini akan dilakukan pengamatan fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak dengan menggunakan pembangkitan tegangan tinggi DC skala laboratorium. Dalam proses pengujian, dilakukan pengukuran arus menggunakan NI 9246 yang disambungkan dengan *personal computer* yang terdapat perangkat lunak LABView dan diolah menggunakan perangkat lunak DIAdem. Dalam waktu yang bersamaan, fenomena *pre-breakdown voltage* akan direkam menggunakan kamera beresolusi tinggi agar didapatkan gambar yang maksimal. Data arus dicocokkan dengan gambar yang diambil oleh kamera pada isolasi minyak selama pengujian. Dengan eksperimen ini dapat diketahui karakteristik arus pada saat fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa fenomena *pre-breakdown voltage* terjadi pada isolasi minyak Shell Diala B pada tegangan pembangkitan antara 28 kV hingga 30 kV dan nilai arus yang terukur pada akuisisi data ketika terjadi fenomena ini adalah 100 mA - 150 mA.

Kata Kunci: Isolasi cair, Karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF CHARACTERISTIC PRE-BREAKDOWN VOLTAGE PHENOMENON BASED EXPERIMENT ON OIL INSULATION

Name : Dwi Krisna Cahyaningrum
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRACT

Pre-breakdown voltage phenomenon is a phenomenon of the failure of the dielectric on media insulating. This phenomenon can affect the performance of a media insulating. The sooner a media insulating experienced the phenomenon of pre-breakdown voltage dielectric strength then the isolation media decline. In this test will be carried out experiment of the phenomenon of pre-breakdown voltage in insulating oil by using a generation of DC high voltage scale laboratory. In the process of experiment, current measurement is performed using NI 9246 connected with personal computer contained software LABView and processed using the software DIAdem. At the same time, the phenomenon of pre-breakdown voltage will be recorded using high resolution camera so that it brings the maximum image. The data of current will be matched with images acquired by a camera in oil insulating during experiment. With this experiment will be known at the time current of characteristics pre-breakdown voltage phenomenon in oil insulation.

Results show that pre-breakdown voltage phenomenon occurred in the isolation of oil Shell Diala B with voltage generation between 28 kV up to 30 kV and the value currents measured at the acquisition of the data when this phenomenon on the value of 100 mA-150 mA.

Keywords: Oil insulation, Characteristic of pre-breakdown voltage phenomenon

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah S.W.T yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Karakteristik Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* Berbasis Pengujian Pada Media Isolasi Minyak**” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Penulisan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Bapak Sutrisno dan Ibu Eny Susilowati yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Mbak Ratih, Jeje dan Chintya yang selalu memberikan semangat kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
4. Rizky Gigih, Rifky Wiryatama, Arief Budi Ksatria yang senantiasa membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. *Mia Khaliffa* Group yang selalu memberikan semangat dan mengingatkan agar segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Srikandi ITS dan Sosialita FC yang telah memberikan saya rumah kedua selama kuliah dan tempat untuk menghilangkan rasa penat ketika menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. *Hochspannung Familien* yang senantiasa mengingatkan dan mendukung penulis agar segera menyelesaikan Tugas Akhir.
8. Keluarga Besar UKM Sepakbola ITS yang selalu memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Mantan penghuni himasuta yang telah memberikan semangat penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

11. Rekan – rekan pecinta teh geret yang menjadi pelipur lara untuk menghilangkan rasa penat ketika mengerjakan Tugas Akhir.
12. Teman-teman dan sahabat lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

TABLE OF CONTENT

COVER	
STATEMENT OF AUTHENTICITY	
APPROVAL SHEET	
ABSTRACT.....	i
PREFACE.....	v
TABLE OF CONTENT.....	vii
TABLE OF ILLUSTRATION.....	ix
TABLE OF TABLES.....	xi
 CHAPTER 1 PRELIMINARY	 1
1.1 Background.....	1
1.2 Systematic Discussion.....	3
CHAPTER 2 SUPPORTING THEORY.....	5
2.1 Oil Insulation.....	5
2.1.1 Characteristic of Oil Insulation.....	5
2.2 Advantages and Disadvantages of Oil Insulation.....	6
2.3 Dielectric Strength.....	7
2.4 Types of Oil Insulation.....	8
2.5 Failure Mechanism of Oil Dielectric.....	8
2.5.1 Pure Substance or Electronic Failure	9
2.5.2 Air Bubbles Failure.....	11
2.5.3 The Ball Oil Failure.....	14
2.5.4 Granules Solid Failure.....	17
2.5.5 Mix Oil-Solid Failure.....	19
2.6 Pre-Breakdown Voltage Phenomenon.....	20
CHAPTER 3 EQUIPMENT EXPERIMENT AND DATA	
PROCESSING.....	23
3.1 Equipment Experiment.....	23
3.1.1 Generation of DC High Voltage.....	24
3.1.2 Electrode Test	26
3.1.3 Oil Insulation.....	26
3.1.4 Data Acquisition Tool.....	27
3.2 Data Processing.....	28
3.2.1 Data Acquisition.....	28
3.2.2 Picture Processing.....	30
CHAPTER 4 DATA ANALYSIS.....	33
4.1 Pre-Breakdown Voltage Phenomenon of Oil	33

<i>Insulating Mechanism.....</i>	
4.1.1 <i>The Increase in Voltage Generation</i>	
<i>Countinously.....</i>	33
4.1.2 <i>Constant Voltage Generation</i>	38
4.2 <i>Characteristic of Current Pre-Breakdown Voltage</i>	
<i>Phenomenon of Oil Insulating.....</i>	43
CHAPTER 5 CLOSING.....	47
5.1 <i>Conclusion</i>	47
5.2 <i>Suggestion</i>	47
BIBLIOGRAPHY	49
BIOGRAPHY	51

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR ISI	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TEORI PENUNJANG	5
2.1 Isolasi Cair	5
2.1.1 Karakteristik Isolasi Cair	5
2.2 Kelebihan dan Kekurangan Isolasi Cair	6
2.3 Kekuatan Dielektrik	7
2.4 Jenis-jenis Isolasi Cair	8
2.5 Mekanisme Kegagalan Dielektrik Cair	8
2.5.1 Teori Kegagalan Zat Murni atau Elektronik	9
2.5.2 Teori Kegagalan Gelembung Udara	11
2.5.3 Teori Kegagalan Bola Cair dalam Media Isolasi Cair	14
2.5.4 Teori Butiran Padat dalam Media Isolasi Cair	17
2.5.5 Kegagalan Campuran Zat Cair-Padat	19
2.6 Fenomena <i>Pre-Breakdown Voltage</i>	20
BAB 3 ALAT PENGUJIAN DAN PENGAMBILAN DATA	23
3.1 Alat Pengujian	23
3.1.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC	25
3.1.2 Elektroda Uji	26
3.1.3 Minyak Isolasi	26
3.1.4 Peralatan Akusisi Data	27
3.2 Pengambilan Data	28
3.2.1 Akusisi Data	28
3.2.2 Pengambilan Gambar	30
BAB 4 ANALISIS DATA	33

4.1 Mekanisme Terjadinya Fenomena <i>Pre-Breakdown Voltage</i> pada Media Isolasi Minyak	33
4.1.2 Kenaikan Tegangan Pembangkitan secara Kontinyu.....	33
4.2.2 Tegangan Pembangkitan Konstan.....	38
4.2 Karakteristik Arus Fenomena <i>Pre-Breakdown Voltage</i> pada Media Isolasi Minyak.....	43
BAB 5 PENUTUP.....	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	51
RIWAYAT HIDUP PENULIS	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Orde tingkat kegagalan isolasi.....	6
Gambar 2.2	Medan listrik dalam dielektrik.....	7
Gambar 2.3	Kegagalan elektronik.....	10
Gambar 2.4	Pengaruh medan terhadap gelembung udara.....	12
Gambar 2.5	Grafik perbandingan hasil perhitungan sesuai dengan teori kekuatan gagal medan gelembung dengan hasil percobaan.....	13
Gambar 2.6	Medan listrik bentuk sferoida.....	14
Gambar 2.7	Grafik hubungan huat medan listrik terhadap nilai γ	15
Gambar 2.8	Bola air yang memanjang memicu kegagalan.....	16
Gambar 2.9	Kegagalan butiran padat.....	17
Gambar 2.10	Tegangan gagal dan tegangan pra peluahan tergantung pada tingkat kehomogenan medan.....	21
Gambar 3.1	Skema perencanaan alat pengujian.....	23
Gambar 3.2	Alat pengujian yang digunakan.....	24
Gambar 3.3	Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC.....	25
Gambar 3.4	Elektroda jarum-plat yang digunakan.....	26
Gambar 3.5	NI 9246.....	27
Gambar 3.6	Tampilan front panel dan block diagram pada LabVIEW yang digunakan untuk pengujian fenomena <i>pre-breakdown voltage</i> pada isolasi minyak.....	29
Gambar 3.7	Tampilan software DIAdem.....	30
Gambar 3.8	Hasil pengambilan gambar.....	31
Gambar 4.1	Kondisi minyak pada saat belum ada perubahan...	34
Gambar 4.2	Perubahan yang terjadi pada kondisi minyak yaitu mulai terbentuknya <i>streamer</i> pada ujung elektroda jarum.....	34
Gambar 4.3	Perkembangan <i>streamer</i>	34
Gambar 4.4	Perubahan pada minyak dengan tegangan pembangkitan 28 kV (a). terjadinya perkembangan pada <i>streamer</i> (b). perkembangan <i>streamer</i> yang terlihat jelas (c). mulai terbentuknya gelembung udara (d). semakin banyak gelembung udara yang terbentuk.....	35
Gambar 4.5	Perubahan pada minyak dengan tegangan	37

	pembangkitan 30 kV (a), terurainya gelembung udara dan adanya gelembung baru yang terbentuk (b), gelembung udara yang terurai semakin banyak.....	
Gambar 4.6	Kondisi minyak saat terjadi <i>breakdown voltage</i>	38
Gambar 4.7	Kondisi minyak sebelum terjadinya perubahan.....	38
Gambar 4.8	Mulai terbentuknya <i>streamer</i> pada ujung elektroda jarum.....	39
Gambar 4.9	<i>Streamer</i> mengalami perkembangan.....	39
Gambar 4.10	Perubahan kondisi minyak pada tegangan pembangkitan sebesar 28 kV (a). <i>streamer</i> terlihat lebih tipis (b). <i>streamer</i> terlihat lebih tebal.....	40
Gambar 4.11	Perubahan kondisi minyak pada tegangan pembangkitan sebesar 28 kV (a). arah <i>streamer</i> terpusat pada satu titik (b). arah <i>streamer</i> tersebar pada bidang elektroda plat.....	41
Gambar 4.12	Perubahan kondisi minyak pada tegangan pembangkitan sebesar 28 kV (a). perkembangan <i>streamer</i> yang semakin jelas (b). perkembangan <i>streamer</i> dan tersebaranya arah <i>streamer</i>	42
Gambar 4.13	Kondisi minyak saat terjadi <i>breakdown voltage</i>	43
Gambar 4.14	Grafik arus hasil pengujian dengan nilai arus yang dicocokkan dengan hasil gambar.....	45
Gambar 4.15	Terjadinya fenomena <i>pre-breakdown voltage</i> pada isolasi minyak yang dicocokkan dengan arus yang terukur.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi peralatan pembangkitan tegangan tinggi DC.....	25
Tabel 3.2	Spesifikasi CT.....	27
Tabel 4.1	Hasil Pengujian.....	41
Tabel 4.2	Arus yang terukur ketika minyak dalam kondisi perubahan.....	46

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Media isolasi merupakan suatu media yang digunakan untuk memisahkan dua atau lebih elektroda bertegangan. Secara umum media isolasi dibagi menjadi 3 (tiga) macam yaitu isolasi padat, cair dan gas [1]. Minyak merupakan jenis isolasi cair. Di dalam peralatan tenaga listrik, isolasi cair memiliki peran penting khususnya pada transformator, circuit breaker, dan kapasitor karena berpengaruh pada kinerja peralatan tersebut. Isolasi cair yang digunakan pada peralatan sistem tenaga biasanya digunakan sebagai bahan isolasi maupun sebagai bahan pendingin [2-4]. Alasan media isolasi cair banyak digunakan sebagai media isolasi peralatan listrik, pertama adalah memiliki kekuatan dielektrik yang lebih baik dibandingkan dengan media isolasi gas menurut hukum Pashen, kedua isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energy, dan yang ketiga yaitu isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*). Namun kekurangan utama isolasi cair yaitu mudah terkontaminasi. Cair juga dapat mengalami proses kegagalan media isolasi. Kontaminasi ini dapat menyebabkan terjadinya kegagalan pada isolasi cair. Fenomena kegagalan isolasi yang sering terjadi pada isolasi antara lain streamer breakdown, corona dan *breakdown voltage* atau tegangan tembus [5]. Kegagalan ini menunjukkan bahwa media isolasi cair yang digunakan memiliki kekuatan dielektrik yang menurun, sehingga dapat mempengaruhi kinerja dari peralatan yang menggunakan media isolasi ini.

Breakdown voltage pada isolasi cair dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain jenis isolasi cair yang digunakan, lama pemakaian, besar tegangan yang dikenakan, partikel, air, dan gelembung. Selain itu bentuk dan material dari elektroda pengujian juga menjadi pengaruh gagalannya isolasi cair. Pada prinsipnya, tegangan pada isolasi merupakan suatu tarikan atau tekanan (stress) yang harus dilawan oleh gaya dalam isolasi itu sendiri agar isolasi tersebut tidak mengalami kegagalan dalam menjalankan fungsinya. Dalam struktur molekul material isolasi, elektron-elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang disebabkan oleh adanya tegangan. Apabila ikatan ini putus pada suatu tempat maka sifat isolasi

pada tempat itu hilang. Apabila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan maka akan terjadi perpindahan elektron-elektron dari satu molekul ke molekul lainnya sehingga timbul arus konduksi atau arus bocor. *Pre-breakdown voltage* merupakan proses dimana isolasi cair akan mengalami kegagalan yang menunjukkan adanya perubahan pada isolasi cair misalnya adanya gelembung pada isolasi cair yang digunakan [6].

Metode yang digunakan pada studi ini adalah pengamatan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* berbasis pengujian untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak. Pengujian pada isolasi minyak dilakukan pada kondisi minyak baru. Metode yang diusulkan diharapkan dapat membantu dalam memahami karakteristik fenomena *pre-breakdown* pada isolasi minyak.

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana menentukan karakteristik dari *pre-breakdown voltage* yang berupa nilai arus ketika sebelum terjadi *breakdown voltage*. Parameter yang selanjutnya yang dicari adalah fenomena-fenomena yang terjadi saat eksperimen berlangsung yang meliputi perubahan arus yang terjadi selama pengujian berlangsung dan pergerakan minyak sesaat sebelum terjadi *breakdown*. Permasalahan dalam studi ini dibatasi pada analisis yang dilakukan terhadap hasil eksperimen fenomena *pre-breakdown voltage* dengan pembangkitan tegangan DC pada isolasi minyak menggunakan elektroda pengujian jarum-plat dengan jarak 1 cm.

Tujuan yang ingin dicapai pada studi ini adalah untuk mengetahui karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak ditinjau dari proses terbentuknya fenomena dan arus yang terukur ketika sedang terjadi fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak. Selanjutnya karakteristik yang didapatkan dapat digunakan untuk mengetahui proses kegagalan suatu bahan isolasi.

Adapun urutan kerja yang akan dilakukan pada studi ini pertama adalah studi literatur. Kedua, setelah studi literatur terlaksana, selanjutnya adalah persiapan alat uji meliputi pemilihan jenis minyak, elektroda yang digunakan serta peralatan yang digunakan untuk pengujian dan pengambilan data serta pengolahan data. Ketiga, setelah mempersiapkan alat uji selanjutnya melakukan pengujian yang bertujuan untuk pengambilan data. Peralatan yang diperlukan untuk pengujian adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC, minyak trafo, elektroda jarum-plat. Untuk mendapatkan akuisisi data pengamatan fenomena *pre-breakdown voltage* digunakan kamera Canon 60D dan NI

9246 untuk merekam arus *pre-breakdown voltage* yang dihubungkan ke NI LABView. Keempat, pengujian yang telah dilakukan akan menghasilkan data sehingga perlu adanya pengolahan data yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak. Data yang diperoleh nantinya akan diolah menggunakan LABView dan Ms. Excel. Data yang diolah berupa data arus yang nantinya akan dicocokkan dengan gambar yang terekam pada kamera. Langkah terakhir yakni memberikan kesimpulan dan melakukan evaluasi terhadap hasil yang diperoleh.

1.2 Sistematika Laporan

Untuk memudahkan pembahasan yang dilakukan dalam analisis ini maka sistematika penulisan dalam penelitian ini terdiri atas lima bab.

Bab pertama merupakan bab pendahuluan yang membahas tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, tujuan, metode dan sistematika dalam penulisan

Bab kedua membahas tentang teori penunjang dalam pengerjaan studi ini. Bab ini membahas tentang isolasi minyak, teori kegagalan isolasi cair, jenis-jenis isolasi cair, kelebihan dan kekurangan isolasi cair, kekuatan dielektrik dan fenomena *pre-breakdown voltage*.

Bab ketiga membahas tentang rancangan alat pengujian yang digunakan dalam pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* dan metode yang digunakan dalam pengambilan data baik data gambar maupun data arus.

Bab keempat merupakan proses analisa data yang dari seluruh data pengujian Sebelum data yang diperoleh dianalisa, terlebih dahulu data diolah agar mudah dalam melakukan sinkronisasi data. Sehingga dalam analisa data, didapatkan hasil sinkronisasi data gambar dan arus untuk fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak.

Terakhir pada bab kelima adalah bab penutup. Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil seluruh pembahasan yang diperoleh.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Isolasi Cair

2.1.1 Karakteristik Isolasi Cair

Isolasi cair memiliki beberapa fungsi antara lain sebagai pemisah antara bagian yang bertegangan, sebagai pendingin, sebagai bahan pengisi pada dielektrik berlapis misalnya dielektrikum minyak/kertas, dan sebagai bahan pemadam busur api pada rangkaian pemutus minyak, sehingga banyak digunakan pada peralatan sistem tenaga listrik misalnya transformator, pemutus tenaga, *switch gear*. Pada dasarnya isolasi cair memiliki dielektrik yang baik dan kemampuan hantar panas yang tinggi melalui proses konveksi [7].

a. Sifat Listrik [8]

Sifat-sifat listrik yang sangat penting dalam menentukan kinerja dielektrik dari dielektrik cair adalah :

- i. *Withstand Breakdown*, kemampuan untuk tidak terjadi tembus tegangan dalam kondisi tekanan listrik (*electric stress*) yang tinggi.
- ii. Resistivitas, suatu cairan dapat menghantarkan arus listrik yang bergantung terhadap besarnya medan listrik dan kerapatan arus. Suatu cairan dapat digolongkan sebagai isolasi cair apabila resistivitasnya lebih dari 10^9 W-m. Pada sistem tegangan tinggi nilai resistivitas yang diperlukan untuk material isolasi adalah 10^{16} W-m atau lebih.
- iii. Faktor Daya, menentukan kualitas kerja yang menunjukkan rugi-rugi dielektrik. Minyak transformator murni mempunyai faktor dissipasi yang bervariasi antara 10^{-4} pada suhu 20° dan 10^{-3} pada suhu 90° dengan frekuensi 50 Hz.
- iv. Kapasitansi Listrik, kemampuan minyak dalam menyimpan muatan listrik. Kapasitansi listrik per unit menentukan pemetivitas relatifnya.

b. Karakteristik Perpindahan Panas

Pada peralatan yang terisi oleh isolasi cair (transformator, kabel, *circuit breaker*, dll) perpindahan panas biasanya dipengaruhi oleh konveksi. Faktor utama yang mempengaruhi perpindahan panas adalah konduktivitas termal dan viskositas. Semakin tinggi nilai dari konduktivitas termal maka semakin

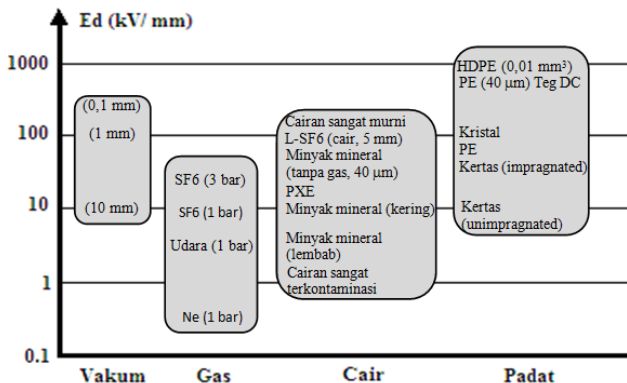
dapat digunakan pada peralatan sebagaimana dapat dioperasikan secara berkelanjutan pada temperature yang tinggi. Pada penggunaan lain, nilai konduktivitas termal yang rendah dan nilai viskositas yang tinggi dapat menjadi penyebab terjadinya pemanasan berlebihan pada area tertentu.

c. Kestabilan Kimiawi

Pada penggunaannya, isolasi cair yang terkena tekanan termal karena adanya material seperti O_2 , air, serat dan hasil-hasil dari pemisahan bahan isolasi padat. Hal tersebut dapat mempengaruhi kestabilan dari rantai kimia bahan isolasi cair.

2.2 Kelebihan dan Kekurangan Isolasi Cair [7]

Media isolasi cair memiliki kelebihan sebagai bahan pengisi yang baik, kekuatan dielektrik yang lebih tinggi dan kemampuan hantar panas yang tinggi melalui proses konfeksi. Perbandingan tingkat kegagalan isolasi pada isolasi padat, cair, gas, dan vakum ditunjukkan pada Gambar 2.6.

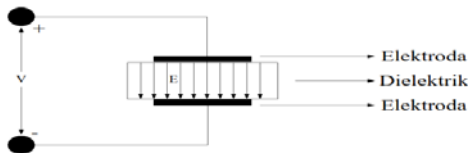


Gambar 2.1 Orde tingkat kegagalan isolasi

Gambar 2.1 merupakan tingkat kegagalan isolasi, terlihat bahwa bahan isolasi cair memiliki waktu lama dalam proses kegagalan. Kekurangan dari isolasi cair adalah kekuatan elektrik berkurang akibat penuaan dan kontaminasi, pemuatan panas, membutuhkan wadah kedap air dan harga lebih mahal. Selain itu, isolasi cair juga berfungsi sebagai pendingin untuk mengurangi rugi rugi panas (pada trafo).

2.3 Kekuatan Dielektrik

Apabila ada dua elektroda piring sejajar diberi tegangan searah V , yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2 Maka timbul medan listrik (E) di dalam dielektrik. Medan listrik ini memberikan gaya kepada elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya menjadi elektron bebas. Sehingga menimbulkan medan listrik menjadi beban terhadap dielektrik dan bersifat sebagai konduktor. Setiap dielektrik mempunyai batas kemampuan untuk memikul beban tersebut. Jika beban tersebut melebihi batas dan berlangsung cukup lama, maka dielektrik akan menghantarkan arus atau gagal dalam menjalankan fungsinya sebagai isolator. Hal ini disebut sebagai tembus listrik atau *breakdown*. Sehingga kekuatan dielektrik dapat diartikan sebagai ukuran kemampuan suatu material untuk bisa tahan terhadap tegangan tinggi tanpa berakibat terjadinya kegagalan.



Gambar 2.2 Medan listrik dalam dielektrik

Pada penerapan tegangan kekuatan dielektrik didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang menyebabkan kerusakan atau tembus listrik (V) dengan tebal isolasi (d) yang memisahkan antara elektroda. Hal ini dapat dilihat dari persamaan :

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

Dengan :

- E : Kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh dielektrik (kV/cm)
- V : Tegangan maksimum yang dapat dibaca alat ukur (kV)
- D : Tebal isolasi

Dalam prakteknya kekuatan dielektrik tergantung pada material dari elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, dan gas yang terdapat dalam cairan yang dapat mengubah sifat molekul cairan. Dalam isolasi cairan kekuatan dielektrik setara dengan tegangan kegagalan yang terjadi.

2.4 Jenis-jenis Isolasi Cair

Minyak merupakan jenis isolasi cair. Minyak isolasi terdiri dari beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan dari cara pembuatan dan bahan pembuatan yaitu :

a. Minyak Isolasi Mineral

Minyak isolasi yang berbahan dasar dari minyak bumi yang diproses dengan cara destilasi. Karakteristik minyak jenis ini mempunyai tahanan isolasi yang tinggi dan stabilitas panas yang baik. Minyak isolasi mineral umumnya banyak digunakan pada peralatan tegangan tinggi seperti transformator daya, kapasitor daya, kabel daya dan circuit breaker. Dalam hal ini minyak isolasi berfungsi sebagai bahan dielektrik, bahan pendingin dan pemadam busur api.

b. Minyak Isolasi Sintesis

Minyak isolasi yang diolah dengan proses kimia untuk mendapatkan karakteristik yang baik. Kelebihan utamanya adalah bersifat tidak mudah terbakar. Namun minyak isolasi jenis ini memiliki kekurangan yaitu mudah terkontaminasi dengan udara. Contoh minyak sintetis diantaranya adalah askarel, silicon cair, fluorinasi cair, dan ester sintetis.

c. Minyak Isolasi Nabati

Kelompok minyak yang berasal dari sari tumbuhan misalnya jenis minyak sayur. Jenis minyak ini mulai banyak dipakai sebagai bahan isolasi pada akhir abad ke-19, terlebih dengan semakin menipisnya cadangan mineral tak terbarukan dan masih kecilnya pemakaian minyak sintetis sehingga minyak nabati mendapatkan perhatian lebih. Contoh minyak isolasi nabati yang pernah diteliti yaitu minyak jarak, minyak kelapa murni, minyak kelapa sawit, minyak kedelai dan minyak jagung.

2.5 Mekanisme Kegagalan Dielektrik Cair [9-10]

Kegagalan dielektrik pada isolasi cair dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu bentuk dan material dari elektroda pengujian juga menjadi pengaruh gagalnya isolasi cair. Beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi cair antara lain partikel, air, dan gelembung. Terdapat empat jenis teori kegagalan pada media isolasi cair, yaitu teori kegagalan zat murni atau elektronik, teori gelembung

udara atau kavitasi, teori kegagalan bola cair, dan teori butiran padat pada isolasi cair.

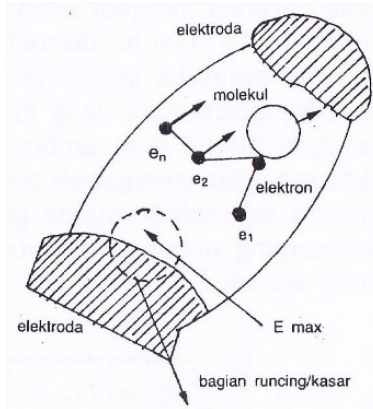
Apabila suatu tegangan dikenakan terhadap dua elektroda yang dicelupkan kedalam minyak (isolasi cair) maka terlihat adanya konduksi arus yang kecil. Apabila tegangan dinaikkan secara kontinyu maka pada titik kritis tertentu akan terjadi lucutan diantara kedua elektroda. Lucutan dalam zat cair ini akan terdiri dari unsur-unsur sebagai berikut :

- a. Aliran listrik yang besarnya ditentukan oleh rangkaian
- b. Lintasan cahaya yang cerah dari elektroda satu ke elektroda yang lain
- c. Terjadi gelembung gas dan butir-butir zat padat hasil dekomposisi zat cair
- d. Terjadi lubang pada elektroda

Mekanisme kegagalan dielektrik pada isolasi cair dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu bentuk dan material dari elektroda pengujian juga menjadi pengaruh gagalnya isolasi cair. Beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi cair antara lain partikel, air, dan gelembung. Terdapat empat jenis teori kegagalan pada media isolasi cair, yaitu teori kegagalan zat murni atau elektronik, teori gelembung udara atau kavitasi, teori kegagalan bola cair, dan teori butiran padat pada isolasi cair.

2.5.1 Teori Kegagalan Zat Murni atau Elektronik

Teori kegagalan zat murni atau elektronik merupakan perluasan teori kegagalan pada media isolasi gas, sehingga kegagalan pada media isolasi cair dianggap serupa dengan media isolasi gas. Kegagalan zat murni atau elektronik diperlukan elektron awal yang dimasukkan kedalam media isolasi cair, elektron awal inilah yang memulai proses kegagalan. Jika elektroda memiliki bagian permukaan tidak rata atau ada bagian yang runcing maka kuat medan terbesar terdapat pada bagian runcing tersebut, sehingga muncul kuat medan listrik yang tinggi di bagian runcing tersebut dan akan mengeluarkan elektron e^{-1} , awal terbentuknya banjiran elektron (*avalnce*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.3 Kegagalan elektronik

Dalam teori kegagalan elektronik dianggap bahwa elektron-elektron akan mendapatkan energi dari kuat medan listrik sehingga elektron dapat membentur molekul-molekul. Proses pembenturan elektron dengan molekul dapat dikatakan proses ionisasi, sehingga proses ionisasi akan memperbanyak elektron yang akan menyebabkan banjir elektron.

Elektron yang dihasilkan berupa $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$ yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam media isolasi cair pada kuat medan listrik tinggi. Menurut Schottky, arus yang timbul tersebut mempunyai kerapatan sebesar :

$$J = J_t e^{\frac{4.4\sqrt{E}}{T}} \left[\frac{A}{cm^2} \right] \quad (2.2)$$

dengan,

$$J_t = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (2.3)$$

dan,

$$E = ME_a \quad (2.4)$$

Dimana,

J = Kerapatan arus konduksi [Acm^{-2}]

J_t = Kerapatan arus termionik [Acm^{-2}]

E_a = Kuat medan yang diterapkan [Vcm^{-1}]

M = Faktor ketidakrataan permukaan (=10 untuk permukaan halus)

Kondisi mulai terjadinya banjir diperoeh dengan menyamakan perolehan energi pada elektron yang menempuh lintasan rata-rata yaitu:

$$U_1 = F\lambda = e E\lambda \quad (2.5)$$

Dengan energi yang diperlukan untuk mengionisasi molekul

$$U_2 = ch \quad (2.6)$$

Dimana,

E = medan yang diterapkan [Vcm^{-1}]

U = energi [*Joule*]

F = gaya [*Newton*]

λ = lintasan bebas rata – rata [*cm*]

h = kuantum energi untuk mengionisasikan molekul [*joule*]

c = konstanta

2.5.2 Teori Kegagalan Gelembung Udara

Teori kegagalan gelembung udara merupakan tidak kemurnian media isolasi cair yang bercampur dengan gelembung udara, gelembung udara merupakan pemicu dari tahap awal kegagalan total pada media cair. Menurut Kao dan Krasucki, sebab-sebab timbulnya gelembung udara adalah sebagai berikut :

1. Permukaan elektroda yang tidak rata, sehingga dapat menimbulkan kantong-kantong udara pada elektroda yang tidak rata pada permukaannya.
2. Adanya tabrakan elektron pada media isolasi cair sehingga menimbulkan produk berupa gelembung udara.
3. Penguapan cairan karena adanya tegangan tembus pada bagian elektroda yang tidak teratur
4. Media isolasi cair mengalami perubahan suhu dan tekanan

Medan listrik dalam gelembung udara yang terdapat pada media isolasi cair dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini :

$$E_b = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \quad (2.7)$$

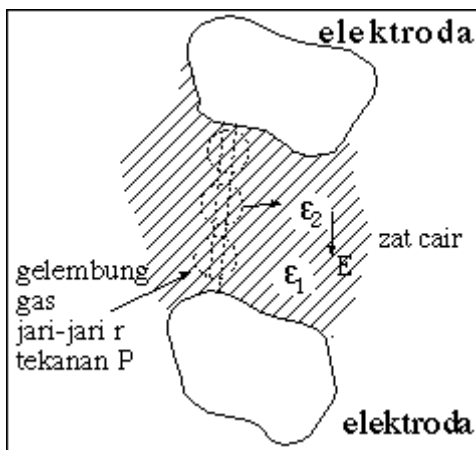
Dimana,

E_b = medan listrik dalam gelembung udara [Vcm^{-1}]

ϵ_1 = permitivitas media isolasi cair

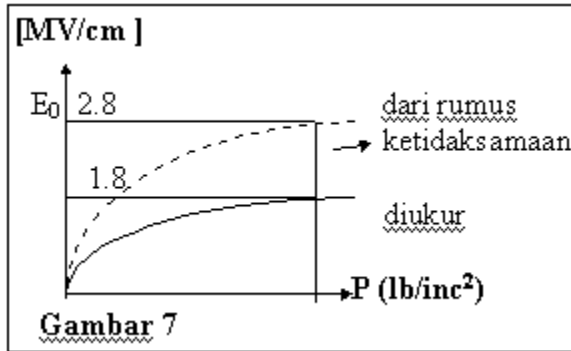
E_0 = medan listrik dalam media cair tanpa gelembung [Vcm^{-1}]

Jika nilai E_b sama dengan medan batas untuk ionisasi gas, maka akan terjadi lompatan listrik dalam gelembung. Hal ini dapat mempercepat pembentukan gas karena dekomposisi media isolasi cair dan dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Bentuk pengaruh medan terhadap gelembung udara ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pengaruh medan terhadap gelembung udara

Karena pengaruh medan listrik antara kedua elektroda, maka gelembung udara yang terdapat pada media isolasi cair antara kedua elektroda tersebut akan menjadi memanjang searah medan. Hal ini disebabkan oleh gelembung udara berusaha membuat energi potensial minimum. Gelembung-gelembung udara yang memanjang tersebut akan menyambung dan membentuk jembatan yang pada akhirnya akan menyebabkan terjadinya kegagalan.



Gambar 2.5 Grafik perbandingan hasil perhitungan sesuai dengan teori kekuatan gagal medan gelembung dengan hasil percobaan

Gambar 2.6 diatas merupakan perbandingan antara perhitungan teoritis dengan percobaan menurut teori kekuatan gagal medan gelembung. Grafik tersebut menunjukkan bahwa teori tersebut kurang relevan pada aktual karena misalnya l untuk cairan n-heksana, ternyata terdapat perbedaan yang cukup besar antara perhitungan teori dengan percobaan. Sebab diakibatkan tidak memperhitungkan gelembung udara kecil awal sebelum terjadinya gelembung besar dengan jari-jari r.

Guna mendapatkan kriteria kegagalan, volume gelembung selama berubah menjadi memanjang dianggap konstan. Kekuatan gagal medan gelembung udara adalah, sebagai berikut:

$$E_0 = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sqrt{\frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{v_b}{2rE_0}} - 1 \right]} \quad (2.8)$$

Dimana,

σ = gaya tegangan (*tension*) permukaan media cair [Nm^{-1}]

ε_1 = permitivitas media cair

ε_2 = permitivitas gelembung

ε_2 = jari-jari awal gelembung(dianggap seperti bola) [cm]

V_b = jatuh tegangan dalam gelembung [V]

Persamaan diatas dapat diartikan implisit dan sangat berpengaruh terhadap jari-jari awal gelembung r. Oleh karena r adalah fungsi dari tekanan suhu luar media isolasi cair, maka jika r besar akan mengakibatkan kekuatan gagal E_0 akan kecil sekali.

2.5.3 Teori Kegagalan Bola Cair dalam Media Isolasi Cair

Jika suatu media isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lain, maka akan menyebabkan kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Bola cair yang diberikan medan listrik E akan merubah menjadi sferoida yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dengan medan didalamnya sebesar E_2 , sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)G} \quad (2.9)$$

Dimana,

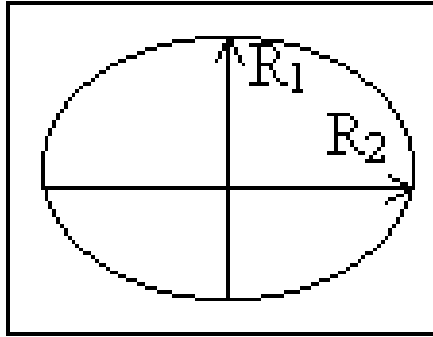
$$G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left\{ \frac{\gamma \cos^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)} - 1 \right\} \text{ dan } \gamma = \frac{R_2}{R_1}$$

R_2 = jari-jari panjang sferoida [cm]

R_1 = jari-jari pendek sferoida [cm]

ε_1 = permitivitas media isolasi cair

ε_2 = permitivitas bola cair



Gambar 2.6 Medan listrik bentuk sferoida

Persamaan kuat medan listrik dalam media isolasi cair, yaitu :

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi \sigma}{\varepsilon_1 R} \right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G \right)} H \quad (2.10)$$

Dimana :

$$H = 2\gamma^{\frac{1}{3}} \left(2\gamma - 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right)$$

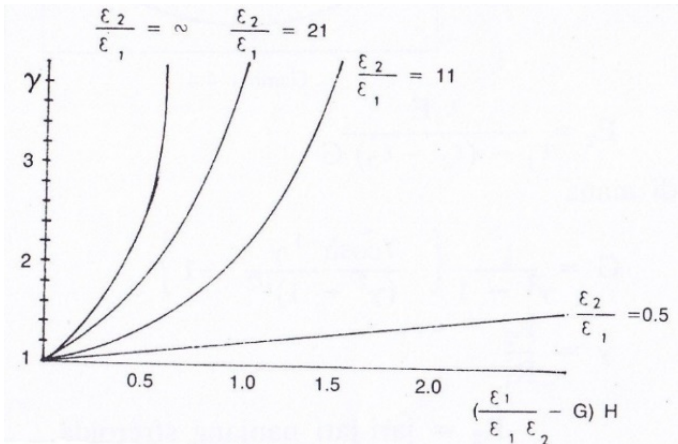
$$R = \frac{3}{4\pi} \text{ volume sferoida [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \text{ gaya tegangan permukaan [Nm}^{-1}\text{]}$$

Bentuk persamaan di atas dapat ditulis menjadi :

$$\frac{E}{600 \sqrt{\frac{\pi \sigma}{\varepsilon_1 R}}} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right) H} \quad (2.11)$$

Persamaan 2.11 sebagai persamaan yang mempunyai hubungan fungsi γ yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Grafik hubungan kuat medan listrik terhadap nilai γ

Pada Gambar 2.7 dapat dilihat bahwa untuk nilai $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ apabila lebih dari 20, maka nilai E akan melewati maksimum jika γ naik, sehingga dapat dikatakan bahwa tidak ada bentuk sferoida yang stabil diatas tekanan listrik kritis. Pada Gambar 2.7 juga dapat dilihat apabila $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ kurang dari 20, maka tidak ada medan kritis meskipun γ dapat melonjak cepat dengan kenaikan medan listrik. Untuk bola cair yang menghantarkan listrik, maka $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \infty$ sehingga persamaan menjadi :

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right)} H \text{ [Vcm}^{-1}\text{]} \quad (2.12)$$

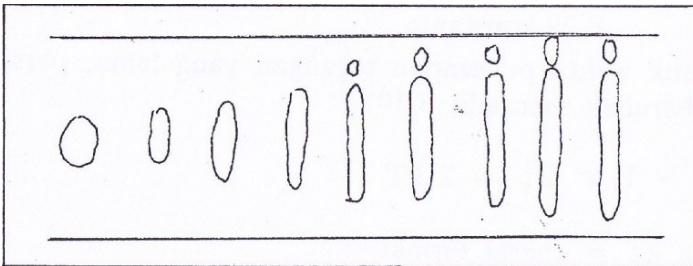
Sehingga dapat ditulis persamaan medan listrik kritis dimana bola cair menjadi tidak stabil sebagai berikut :

$$Ek = 487,7 \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon_1 R}} \text{ [Vcm}^{-1}\text{]} \quad (2.13)$$

Sebagai contoh untuk bola cair dalam media isolasi minyak dengan $\sigma = 43 \text{ dyne/cm}$, $\varepsilon_1 = 2$ dan $R = 1 \text{ }\mu\text{m}$, maka medan listrik kritisnya adalah $Ek = 0,266 \text{ MVcm}^{-1}$.

Medan listrik kritis ini jauh lebih rendah daripada kekuatan gagal media isolasi cair yang bersih, sehingga merupakan sumber kegagalan pada media isolasi cair. Bola air yang sangat kecil pun, misal $R = 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ masih dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan pada medan listrik $Ek = 1 \text{ MVcm}^{-1}$.

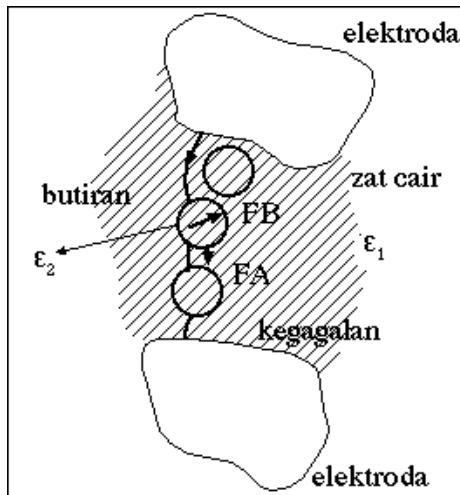
Contoh kegagalan dielektrik diakibatkan bola cair pada media isolasi cair pada media silikon cair ditunjukkan pada Gambar 2.8. Setelah terjadi bola cair dan keadaan tidak stabil maka bola cair akan memanjang, sehingga jika bola cair sudah mencapai dua pertiga celah elektroda, maka saluran-saluran lucutan akan timbul yang dapat mengakibatkan terjadi kegagalan total.



Gambar 2.8 Bola air yang memanjang memicu kegagalan

2.5.4 Teori Butiran Padat dalam Media Isolasi Cair

Kegagalan butiran padat merupakan jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya partikel (*particle*) atau butiran zat padat pada media isolasi cair yang akan menyebabkan terjadinya kegagalan. Butiran padat mempunyai sifat permitivitas berlainan dengan permitivitas zat isolasi cair. Jika butiran-butiran padat mempunyai permitivitas ϵ_2 dan permitivitas media isolasi cair adalah ϵ_1 , yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9 Kegagalan butiran padat

Besarnya gaya yang bekerja pada butiran padat dalam medan yang tak seragam dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$F = r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \text{ grad } E \quad (2.14)$$

Dimana,

F = gaya [*Newton*]

r = jari-jari butiran [cm]

$\text{grad } E$ = gradien tegangan [Vcm^{-1}]

Secara khusus, persamaan di atas dapat ditulis menjadi seperti:

$$F = \left(\frac{1}{2r^3} \right) \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \right) E^2 \text{ grad} \quad (2.15)$$

Untuk persamaan di atas terdapat dua kemungkinan yang terjadi, yaitu :

1. Jika $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran padat menjadi searah dengan tekanan elektrik maksimum (F_A), sehingga butiran padat akan terdorong ke arah medan yang paling kuat.
2. Jika $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (F_B).

Gaya F semakin besar jika ε_2 besar. Untuk butiran yang mempunyai nilai $\varepsilon_2 = \infty$, maka akan menyebabkan gaya yang bekerja pada butiran padat dalam medan yang tak seragam menjadi :

$$F = \left(\frac{1}{2r^3} \right) E^2 \text{ grad} \quad (2.16)$$

Untuk medan yang seragam, seperti elektroda bola ataupun pada elektroda piringan sejajar dengan celah kecil, medan paling kuat bertempat pada tempat yang seragam. Dalam hal ini $E^2 \text{ grad} = 0$ dan butiran dalam keadaan seimbang. Karena itu, butiran akan ditarik oleh gaya ke tempat dimana medan seragam. Akibatnya butiran padat akan menempati antara kedua elektroda dan seakan membuat jembatan yang dapat disebut jembatan serat, kemudian jembatan serat ini yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan pada media isolasi cair.

Adanya butiran penghantar di antara elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam media isolasi cair di dekat butiran padat. Pembesaran medan ditentukan oleh bentuk butiran, yaitu :

1. Butiran padat bulat ($\gamma = 1$) ; $E_1 = 3 E$
2. Butiran padat sferoida ($\gamma = 2$) ; $E_1 = 5.8 E$
3. Butiran padat sferoida ($\gamma = 5$) ; $E_1 = 18 E$

dimana, γ = perbandingan jari-jari pendek sferoida

E = medan dalam cairan tanpa butiran [Vcm^{-1}]

E_1 = medan dalam cairan pada ujung butiran [Vcm^{-1}]

Apabila E_1 melebihi tegangan gagal cairan maka akan terjadi kegagalan setempat yang kemudian menimbulkan gelembung-gelembung yang akhirnya dapat mengakibatkan kegagalan total pada cairan. Gerakan butiran yang disebabkan oleh gaya F akan dihambat

oleh kekentalan medan isolasi cair. Dalam hubungan ini dapat dihitung dalam rumus waktu yang diperlukan terjadinya kegagalan menurut Kok-Corbey besarnya adalah :

$$t_b = \frac{\eta^2 c}{g^4 r^7 (E_b^2 - E_0^2) N} \quad (2.17)$$

Dimana,

E_b = kekuatan gagal untuk waktu penerapan tekanan listrik singkat [Vcm⁻¹]

E_0 = kekuatan gagal dalam waktu lama [Vcm⁻¹]

g = faktor kekasaran (*asperity*)

= 3 untuk kekasaran berbentuk setengah bola

N = konsentrasi butiran

η = kekentalan (viskositas) [mm²s⁻¹]

r = jari-jari butiran [cm]

c = konstanta

t_b = waktu kegagalan [s]

Untuk waktu penerapan tegangan yang lama akan merubah persamaan, sehingga persamaan lamanya waktu kegagalan diatas berubah menjadi :

$$(g^1 - 1)r^3 E_0^2 = 2kT \quad (2.18)$$

dimana kT adalah energi termal (*Joule*). Bila $r = 3$, yaitu bila kekasarannya berbentuk setengah bola, maka persamaannya menjadi:

$$r^3 E_0^2 = \frac{1}{4} kT \quad (2.19)$$

2.5.5 Kegagalan Campuran Zat Cair-Padat

Kegagalan isolasi cair-padat (isolasi kertas dicelup dalam minyak) biasanya disebabkan oleh pemburukan. Pemburukan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi cair-padat yaitu pemburukan karena pelepasan dalam (*internal discharge*) dan pemburukan elektro-kimiawi

Jika campuran dielektrik cair-padat memiliki kekuatan gagal yang berbeda maka jika tegangan listrik dinaikkan akan terjadi kegagalan pada zat yang paling lemah. Hal ini dapat mengakibatkan

kegagalan parsial (*patrial discharge*). Pelepasan ini mengakibatkan pemburukan perlahan yang disebabkan oleh :

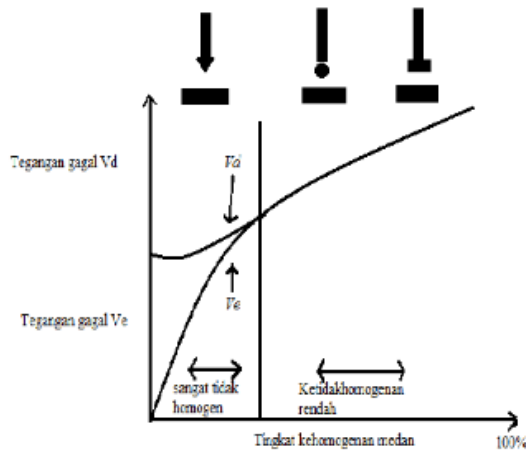
- Disintegrasi dielektrik padat yang diakibatkan pemohonan oleh elektron dan ini yang dihasilkan
- Aksi kimiawi pada dielektrik karena ionisasi gas
- Suhu tinggi di daerah pelepasan.

Pemburukan elektro-kimiawi terjadi karena ion-ion yang dibebaskan oleh arus pada elektroda bisa menyebabkan kerusakan. Derajat kerusakan yang terjadi tergantung pada sifat ion yang terbawa dan reaksi kimia dengan ionisasi. Kerusakan bisa terjadi pada tegangan DC maupun AC.

2.6 Fenomena *Pre-Breakdown Voltage*

Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* yaitu suatu fenomena yang terjadi pada proses menuju kegagalan suatu bahan isolasi. Kegagalan yang terjadi yaitu *breakdown voltage*. Salah satu penyebab terjadinya kegagalan pada bahan isolasi dipengaruhi oleh jenis bahan isolasi, jenis elektroda yang digunakan, jarak sela elektroda, kontaminasi udara sekitar dan kekuatan dielektrik bahan isolasi itu sendiri [6].

Fenomena *pre-breakdown voltage* dapat dilihat pada pemakaian elektroda yang memiliki bentuk tidak sama, misalnya elektroda jarum-plat. Hal ini disebabkan karena medan listrik akan berkumpul pada salah satu titik yang memiliki bentuk lebih runcing atau membentuk sudut siku-siku. Sehingga pada pengujian dengan menggunakan elektroda jenis jarum-plat akan ditemukan jenis kegagalan pada medan tidak seragam [7]. Jika pada pengujian yang dilakukan, tegangan dinaikkan pada tingkat pra-peluahan maka akan berkembang menjadi peluahan yang menghubungkan kedua elektroda. Gambar 2.10 menunjukkan tingkat kegagalan berdasarkan ketidakhomogenan medan dan tegangan gagal. Pada elektroda yang sangat tajam akan terbentuk muatan ruang melalui pra-peluahan yang mengakibatkan efek polaritas. Efek polaritas adalah adanya perbedaan peluahan dan perbedaan pergerakan elektron dan ion yang bergantung pada polaritas ujung elektroda. Seiring dengan peningkatan tegangan, pada susunan elektroda dengan tingkat ketidakhomogenan yang tinggi akan terjadi peluahan yaitu korona, streamer, leader, dan kegagalan.



Gambar 2.10 Tegangan gagal dan tegangan pra peluahan tergantung pada tingkat kehomogenan medan.

Streamer dapat terbentuk ketika media isolasi (misalnya udara) terkena beda potensial yang besar. Ketika medan listrik yang diciptakan oleh tegangan yang diberikan cukup besar, elektron dipercepat menyerang molekul udara dengan energi yang cukup untuk menarik elektron hingga elektron yang tertarik dapat menarik elektron lainnya dan terbentuklah banjir elektron yang terionisasi. Muatan ruang yang diciptakan oleh banjir elektron menimbulkan medan listrik tambahan yang dapat meningkatkan pertumbuhan banjir elektron baru dengan arah tertentu. Sedangkan elektron yang terionisasi mengalami perkembangan dengan cepat ke arah banjir elektron yang terbentuk dan membentuk pita-pita seperti jala yang disebut *streamer*. [11]

Pada media isolasi minyak, awal mula terjadinya fenomena *pre-breakdown* ditandai dengan munculnya *streamer*, *streamer* ini mengalami perkembangan hingga munculnya gelembung udara yang mempunyai permeabilitas bahan lebih rendah dari sekelilingnya. Pada rongga udara yang terbentuk terjadi efek kapasitansi secara sebagian yang menyebabkan intensitas medan yang besar dapat menyebabkan loncatan muatan. Sebelum terjadinya loncatan muatan, pada isolasi minyak terjadi pergerakan minyak yang menunjukkan adanya efek kapasitansi. Loncatan muatan akan terendam dan mulai melakukan pengisian muatan sampai menemukan rongga lagi untuk melepaskannya

kembali. Fenomena pelepasan muatan yang singkat ini dan pengisian yang lama terjadi secara berulang ini disebut sebagai fenomena *pre-breakdown voltage*. Apabila fenomena ini terjadi secara terus-menerus akan mengakibatkan kegagalan yang dapat merusak bahan isolasi.

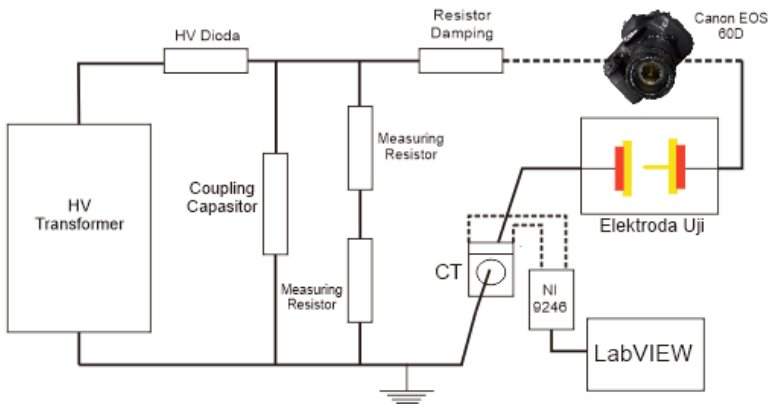
BAB 3

ALAT PENGUJIAN DAN PENGAMBILAN DATA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai alat pengujian untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak dan proses pengambilan data yang dilakukan.

3.1 Alat Pengujian

Untuk mengetahui karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak dibutuhkan suatu alat pengujian untuk melakukan pengujian. Skema perencanaan alat pengujian dan peralatan yang digunakan untuk mendapatkan fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak terdapat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.1 Skema perencanaan alat pengujian



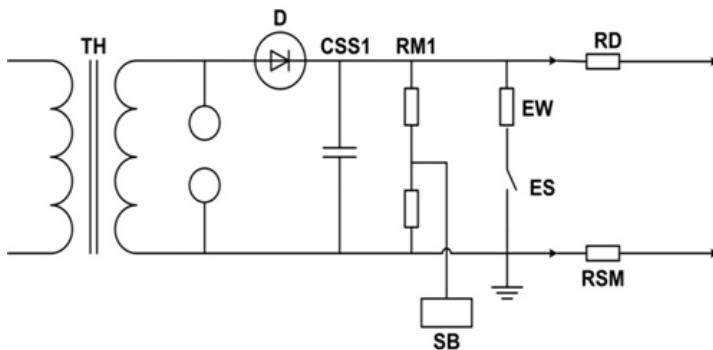
Gambar 3.2 Alat pengujian yang digunakan

Peralatan yang digunakan untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak dibedakan menjadi 2 yaitu perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras berfungsi dalam pengujian untuk mendapatkan hasil yang nantinya hasil berupa data ini diakuisisi oleh perangkat keras. Sesuai dengan alat pengujian yang digunakan yang tersaji pada Gambar 3.2, terdapat 7 komponen utama baik perangkat lunak maupun perangkat keras yang digunakan dalam pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak yaitu pembangkitan tegangan tinggi DC, elektroda uji, minyak isolasi, kamera Canon 60D, *Current Transformer* (CT), NI 9246, dan Personal Komputer yang berfungsi untuk menjalankan perangkat lunak LABView.

3.1.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Pembangkitan yang digunakan dalam pengujian ini adalah pembangkitan tegangan tinggi DC yang terdapat di laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS. Pada Gambar 3.3 merupakan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC. Pada rangkain tersebut terlihat bahwa diperlukan beberapa peralatan antara lain *High Voltage Transformer* (TH) sebagai trafo *step-up*, Dioda (D) sebagai penyearah

tegangan, *Coupling Capacitor* (CSS1) yang berfungsi untuk mengurangi ripple tegangan, *Measuring Resistor* (RM1) yang berfungsi sebagai range pengisian tegangan atau pembangkitan tegangan yang diberikan untuk pengujian, *Resistor Damping* (RD) yang ada pada rangkaian sebagai pembagi tegangan, *Grounding* (EW, ES) yang berfungsi sebagai pengaman dari peralatan pembangkitan dan *Control Box* (SB) sebagai pengatur dalam pembangkitan tegangan. Spesifikasi pembangkitan tegangan tinggi yang digunakan dalam pengujian ini tersaji dalam tabel dibawah ini.



Gambar 3.3 Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC

Tabel 3.1 Spesifikasi peralatan pembangkitan tegangan tinggi DC

<i>High Voltage Transformer</i>	80 kV rms, 5 kVA
<i>High Voltage Diode</i>	100 kV, 20 mA
<i>Coupling Capacitor</i>	100 kV, 20 mA
<i>Measuring Resistor with Test Jack</i>	200 kV DC, 800 MΩ
<i>Resistor Damping</i>	6 kΩ
<i>Grounding Resistor</i>	200 kV DC, 25 kΩ
<i>Grounding Switch</i>	
<i>Control Box</i>	Type 273

Tegangan suplai yang digunakan sebagai sumber yaitu sumber dari PLN yaitu tegangan AC 220V. Tegangan AC 220V tersebut menyuplai *High Voltage Transformer* yang memiliki perbandingan 220V/80.000V, maka keluaran dari trafo penaik tegangan ini yaitu tegangan AC yang memiliki tegangan maksimal 80kV. Selanjutnya tegangan yang telah

terbangkitkan oleh trafo tersebut disearakan dengan dioda sehingga menghasilkan tegangan DC setengah gelombang yang digunakan untuk menyuplai resistor yang memiliki nilai $800M\Omega$ yang bertindak sebagai range tegangan yang akan dibangkitkan yang dikontrol oleh *Control Box*.

3.1.2 Elektroda Uji

Elektroda yang digunakan dalam pengujian ini adalah elektroda jarum dan plat yang terbuat dari *stainless steel* dan tembaga. Elektroda jarum dimanfaatkan sebagai anoda sedangkan elektroda plat sebagai katoda. Diameter dari jarum yang digunakan yaitu 1mm. Bentuk elektroda yang digunakan dalam pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Elektroda jarum-plat yang digunakan

3.1.3 Minyak Isolasi

Jenis minyak isolasi yang digunakan sebagai bahan uji pada penelitian ini adalah *Shell Diala B*. *Shell Diala B* adalah minyak mineral yang terbuat dari bahan baku naftenat yang memberikan kinerja isolasi yang baik dan memberikan perlindungan terhadap korosi. Selain itu, *Shell Diala Oil B* memiliki sifat dielektrik yang baik. Hal ini sangat tahan terhadap degradasi oksidatif (yaitu pembentukan asam dan lumpur) dan menjadi viskositas rendah beredar dengan mudah untuk memberikan perpindahan panas yang efisien.

Pada pengujian ini dibutuhkan minyak sebanyak 1 liter. Minyak yang digunakan dalam pengujian dimasukkan kedalam wadah yang terbuat dari bahan akrilik. Wadah ini berukuran 14x14x15cm dengan ketebalan 4 inci.

3.1.4 Peralatan Akuisi Data

Peralatan akuisisi data yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Current Transformer* (CT) dan NI 9246.

Current Transformer (CT) atau trafo arus adalah peralatan sistem tenaga yang digunakan untuk pengubah skala arus listrik pada saat pengukuran arus. Pada pengujian ini trafo arus digunakan sebagai perantara untuk penyambung dengan alat akuisisi data berupa NI 9246. NI 9246 biasanya digunakan dalam pengukuran data berupa arus. Tabel 3.1 dibawah ini merupakan spesifikasi CT yang digunakan dalam pengujian.

Tabel 3.2 Spesifikasi CT

Jenis CT	Powell MSQ-30
Rasio CT	250/5
Class CT	1
Burden CT	5
Range Frekuensi	50-60 Hz

NI 9246 merupakan *Compact DAQ* (cDAQ) atau *Analogue Input Module* yang digunakan sebagai akuisisi data berupa data arus. Alat ini merupakan produk keluaran dari National Instruments. Dalam penggunaannya alat ini dihubungkan ke PC yang menjalankan program LabVIEW. NI 9246 ini dilengkapi dengan 3 input analog terisolasi dengan *sample rate* secara simultan sebesar 50 kHz tiap channel dan arus input sebesar ± 20 A. Gambar 3.5 merupakan bentuk dari NI 9246.



Gambar 3.5 NI 9246

3.2 Pengambilan Data

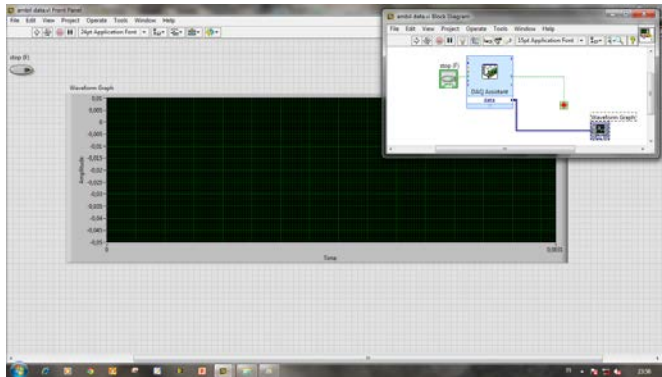
Proses pengambilan data dilakukan di Laboraturium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS secara langsung, yaitu dengan melakukan pengujian *breakdown voltage* berskala laboratorium. Pengujian ini dilakukan dengan membangkitkan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan yang terhubung dengan modul pengujian isolasi minyak. Akuisisi data meliputi arus dan representasi berupa gambar saat terjadi fenomena *pre-breakdown voltage* yang

3.2.1 Akuisi Data

Akuisisi data pada pengujian ini menggunakan NI 9246 yang terhubung dengan personal komputer yang dilengkapi dengan perangkat lunak LabVIEW untuk merekam arus dan bentuk arus saat terjadi perubahan arus. LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) adalah perangkat lunak yang menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis (non-teks) yang dikembangkan oleh National Instrument untuk menciptakan sebuah aplikasi akuisisi data yang diinginkan oleh *user*.

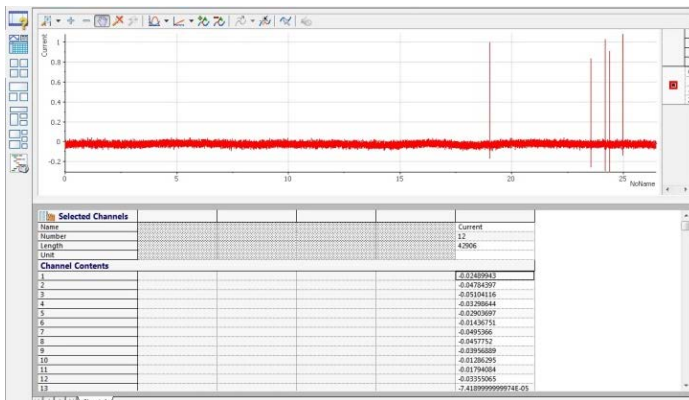
Dalam pengujian ini, LabVIEW digunakan sebagai instrumentasi virtual untuk mempermudah dalam sistem pengambilan data secara otomatis melalui perangkat *hardware* eksternal misalnya cDAQ yang bertindak sebagai akuisisi data. LabVIEW yang digunakan dalam pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* adalah versi 2014. LabVIEW ini menjalankan program berdasarkan alur yang dibuat oleh *user*. Dengan bahasa pemrograman berupa blok diagram didalamnya. LabVIEW mendapatkan data dari perangkat *hardware* eksternal yang selanjutnya dapat dilakukan data logging atau perekaman data dan pengolahan data dengan file berformat tdms. Hasil pengukuran yang diperoleh selanjutnya akan ditampilkan pada front panel LabVIEW melalui layar PC komputer seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6.

Akuisisi data ini dimulai pada saat minyak telah menunjukkan tanda-tanda akan terjadi *breakdown voltage* misalnya adanya desis dan nilai tegangan pembangkitan mendekati nilai *breakdown voltage*. Sehingga data yang terekam hanya data sesaat sebelum terjadi *breakdown voltage* atau tegangan tembus. Pada saat akuisisi data, data yang diperoleh secara otomatis akan tersimpan pada *data logging* LabVIEW. Sehingga apabila ingin mengulang proses akuisisi data, data sebelumnya tetap tersimpan.



Gambar 3.6 Tampilan *front panel* dan *block diagram* pada LabVIEW yang digunakan untuk pengujian fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak.

Dalam proses pengambilan data, data keluaran dari proses *data logging* pada alat akuisisi data (perangkat lunak LabVIEW) saat pengujian *pre-breakdown voltage* yang dilakukan adalah data dalam format '.tdms'. Sehingga diperlukan perangkat lunak bantu untuk membaca dan mengolah data keluaran dari proses akuisisi data. Perangkat lunak yang membantu dalam pemotongan sinyal yang akan difilter adalah DIAdem. Pemotongan sinyal perlu dilakukan karena pada saat pengambilan data sampling data yang tersimpan terlalu banyak. Tampilan software DIAdem dapat dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3.7 Tampilan software DIAdem

Pada DIAdem data dalam format ‘.tdms’ hasil keluaran LabVIEW ditampilkan dalam bentuk sinyal arus (I) yang berisikan nilai amplitudo masing-masing sinyal sampling yang terbagi pada kanal (channel) sesuai jumlah sampling saat pengambilan data. Pemotongan sinyal dilakukan dengan cara mengambil nilai dari kanal DIAdem.

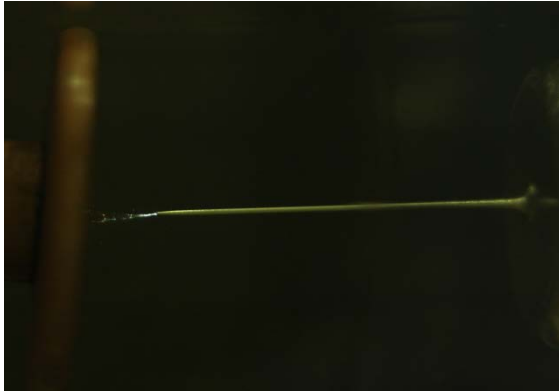
3.2.2 Pengambilan Gambar

Pengambilan gambar ini bertujuan untuk mengetahui perubahan bentuk minyak saat terjadi kenaikan tegangan dan data akuisisi menunjukkan adanya perubahan arus. Pengambilan gambar ini menggunakan kamera beresolusi tinggi untuk mendapatkan hasil perubahan yang terlihat jelas. Kamera yang digunakan memiliki spesifikasi kecepatan pengambilan gambar yaitu 5 frame gambar per detik dengan resolusi 5184 x 3456 pixels. Dengan *range shutter speed* atau kecepatan menangkap gambar sebesar 30-1/8000 detik.

Proses pengambilan gambar ini dimulai pada saat minyak telah menunjukkan tanda-tanda akan terjadi *breakdown voltage* misalnya adanya desis dan nilai tegangan pembangkitan mendekati nilai *breakdown voltage* dan mode yang digunakan yaitu pengambilan gambar secara kontinyu. Sehingga data yang terekam hanya data sesaat sebelum terjadi *breakdown voltage* atau tegangan tembus. Sehingga gambar yang terambil hanya gambar sesaat sebelum terjadinya *breakdown voltage*.

Kamera yang digunakan dapat mengambil gambar sebanyak 5 gambar dalam waktu 1 detik. Sehingga didapatkan hasil gambar yang

cukup banyak dalam proses pengambilan gambar ini. Oleh karena itu, proses akuisisi data dan pengambilan gambar dilakukan secara bersama-sama agar hasil yang didapatkan dapat dilihat dan disesuaikan dengan arus yang terukur. Gambar 3.7 dibawah ini merupakan hasil pengambilan gambar yang dilakukan.



Gambar 3.8 Hasil pengambilan gambar

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

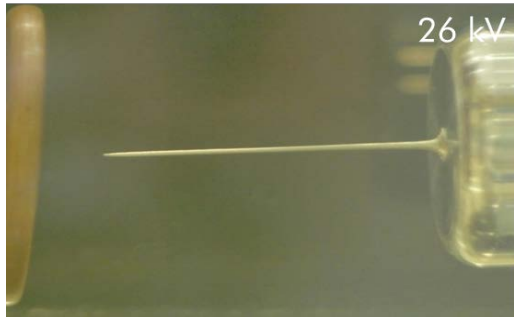
ANALISA DATA

4.1 Mekanisme Terjadinya Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* pada Media Isolasi Minyak

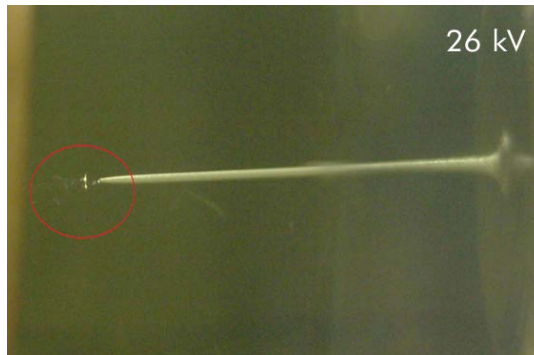
Mekanisme yang terjadi pada proses pengambilan data yaitu mekanisme *pre-breakdown voltage* yang menunjukkan proses menuju kegagalan media isolasi minyak. Proses pengambilan data ini berlangsung menggunakan kamera guna mengambil gambar dan mengamati perubahan pada kondisi minyak yang berlangsung ketika pengujian dilakukan. Hal ini dilakukan dengan membangkitkan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan yang disambungkan dengan modul pengujian yang telah dilengkapi elektroda set dan minyak yang diletakkan pada wadah akrilik. Pembangkitan tegangan secara bertahap dinaikkan dengan memutar *charging range* pada *control box* maka tegangan yang dibangkitkan mengalami kenaikan. Proses ini berlangsung hingga minyak yang diuji mulai menunjukkan desis dan pergerakan minyak berupa gelembung gas.

4.1.1 Kenaikan Tegangan Pembangkitan secara Kontinyu

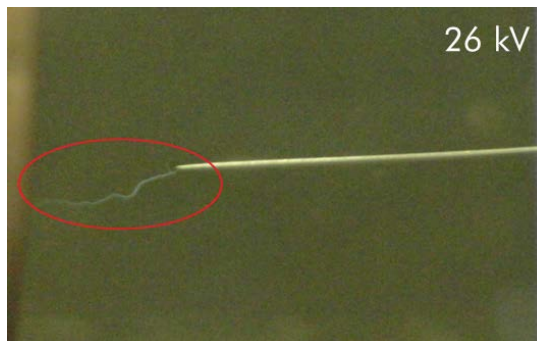
Pada pengujian ini tegangan yang dibangkitkan pada pembangkitan tegangan tinggi DC dilakukan secara bertahap atau dinaikkan secara kontinyu, yaitu kenaikan 2 kV tiap 10 detik. Kenaikan ini dilakukan untuk mempercepat proses terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak Shell Diala B. Awal mula tegangan dinaikkan pada nilai 2 kV selama 10 detik kemudian dinaikkan tiap 10 detik dengan kenaikan sebesar 2 kV. Hasil yang diperoleh dari pengujian ini adalah perubahan pada kondisi minyak terjadi dimulai pada nilai tegangan sebesar 26 kV. Sehingga perekaman gambar dilakukan mulai pada nilai tegangan pembangkitan sebesar 26 kV. Gambar dibawah ini adalah gambar dimana terjadi perubahan pada kondisi minyak ketika tegangan pembangkitan yang diberikan untuk pengujian sebesar 26 kV. Pada Gambar 4.1 dibawah ini terlihat belum adanya tanda-tanda terjadinya perubahan kondisi minyak. Namun perubahan yang sangat cepat terjadi pada minyak yaitu mulai terbentuknya *streamer* pada ujung jarum yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.1 Kondisi minyak pada saat belum ada perubahan



Gambar 4.2 Perubahan yang terjadi pada kondisi minyak yaitu mulai terbentuknya *streamer* pada ujung elektroda jarum

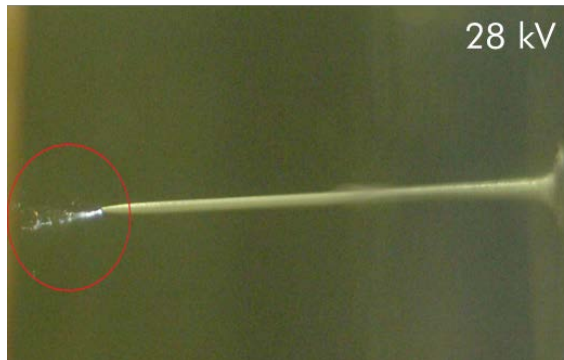


Gambar 4.3 Perkembangan *streamer*

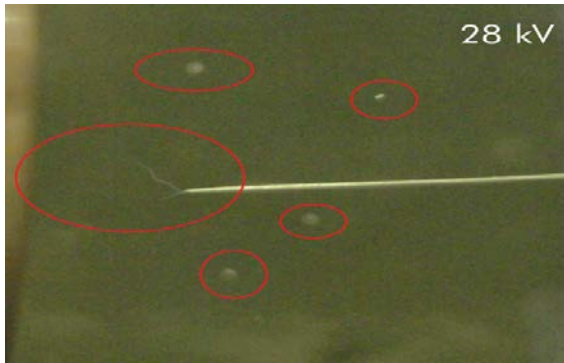
Pada tegangan 28 kV yang berarti dinaikkan sebesar 2 kV selama 10 detik, terlihat pada gambar yang terambil oleh kamera mengalami perubahan antara lain semakin berkembangnya *streamer* pada ujung elektroda jarum karena adanya medan listrik yang sangat besar yang mengakibatkan efek polaritas dan mulai terbentuknya gelembung pada minyak. Gelembung merupakan molekul uap air yang memisahkan dari minyak dan membentuk suatu dipol. Jika jumlah gelembung semakin banyak akan menimbulkan kanal peluahan yang pada akhirnya kanal tersebut akan merambat memanjang hingga membentuk suatu jembatan



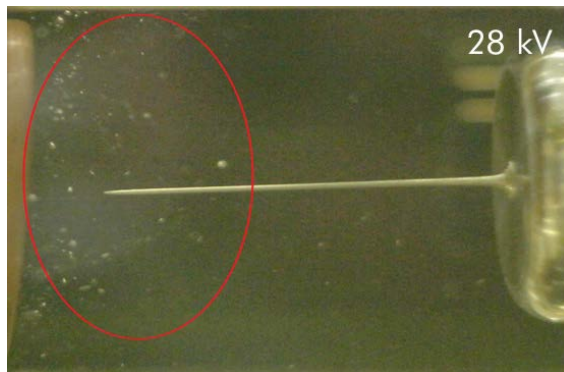
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.4 Perubahan pada minyak dengan tegangan pembangkitan 28 kV (a). terjadinya perkembangan pada *streamer* (b). perkembangan *streamer* yang terlihat jelas (c). mulai terbentuknya gelembung udara (d). semakin banyak gelembung udara yang terbentuk

Selanjutnya tegangan pembangkitan dinaikkan menjadi 30 kV, pada nilai tegangan ini minyak tetap mengalami perubahan hingga terjadinya *breakdown voltage* (tegangan tembus). Karena pada tegangan 28 kV telah adanya faktor yang mempengaruhi kegagalan suatu bahan isolasi cair yaitu munculnya gelembung udara. Pada kondisi ini terlihat bahwa gelembung yang terbentuk mulai terurai karena adanya *stress* tegangan yang terlalu tinggi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5 dibawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Perubahan pada minyak dengan tegangan pembangkitan 30 kV (a). terurainya gelembung udara dan adanya gelembung baru yang terbentuk (b). gelembung udara yang terurai semakin banyak.

Seiring dengan terurainya gelembung udara pada isolasi minyak, pada tegangan pembangkitan 30 kV juga terjadi *breakdown voltage*. Sehingga fenomena *pre-breakdown voltage* terjadi hingga tegangan 30 kV dalam waktu yang sangat cepat. Perubahan yang ditunjukkan oleh fenomena ini terjadi sangat cepat. Setelah gelembung udara terurai, terjadi perubahan kondisi minyak yaitu terdengarnya bunyi letupan dan nyala api pada minyak. Gambar 4.6 merupakan kondisi minyak ketika terjadi *breakdown voltage*.



Gambar 4.6 Kondisi minyak saat terjadi *breakdown voltage*

Pembangkitan tegangan yang diberikan juga dapat mempengaruhi lamanya waktu perubahan pada minyak. Selain itu pada pengujian ini minyak tidak tertutup dengan rapat sehingga ketidakmurnian dari minyak juga dapat mempengaruhi terjadinya kegagalan dan mempercepat proses *pre-breakdown voltage*.

4.1.2 Tegangan Pembangkitan Konstan

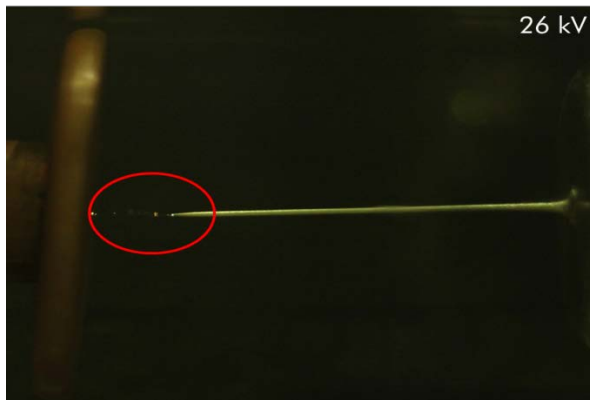
Pada pengujian ini dilakukan sama dengan pengujian sebelumnya, yang membedakan yaitu tegangan yang diberikan di tahan pada nilai 28 kV. Pada pengujian ini perekaman gambar tetap dimulai pada tegangan pembangkitan sebesar 26 kV. Dibawah ini merupakan gambar yang diambil oleh kamera ketika melakukan pengujian.



Gambar 4.7 Kondisi minyak sebelum terjadinya perubahan

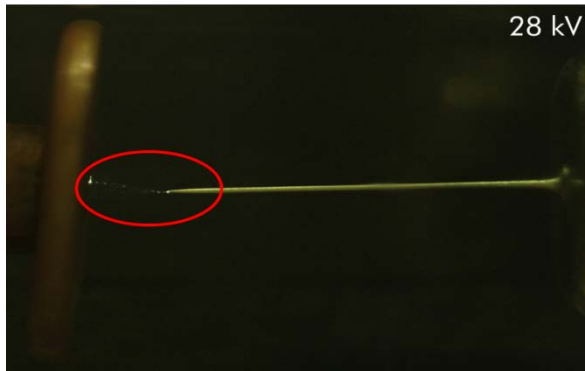


Gambar 4.8 Mulai terbentuknya *streamer* pada ujung elektroda jarum



Gambar 4.9 *Streamer* mengalami perkembangan

Pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 telah terlihat adanya perubahan pada ujung elektroda jarum yaitu mulai muncul dan berkembangnya *streamer*. Hal ini terjadi pada nilai tegangan pembangkitan sebesar 26 kV dan dalam waktu 10 detik. Sehingga fenomena ini berlangsung dalam waktu yang sangat cepat. Selanjutnya pada nilai tegangan pembangkitan sebesar 28 kV, *streamer* yang telah terbentuk terus mengalami perubahan misalnya semakin terlihat dan dengan arah pantulan yang berbeda. Pada kondisi ini tegangan ditahan hingga mengalami *breakdown voltage* dalam range waktu selama 2 1 menit.



(a)



(b)

Gambar 4.10 Perubahan kondisi minyak pada tegangan pembangkitan sebesar 28 kV (a). *streamer* terlihat lebih tipis (b). *streamer* terlihat lebih tebal

Pada Gambar 4.10 diatas terlihat bahwa adanya perbedaan dari *streamer* yang terbentuk. Hal ini dapat terjadi karena adanya efek polaritas. Selain itu arah dari *streamer* juga dapat dilihat pada Gambar 4.12 dibawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.11 Perubahan kondisi minyak pada tegangan pembangkitan sebesar 28 kV (a). arah *streamer* terpusat pada satu titik (b). arah *streamer* tersebar pada bidang elektroda plat

Pada kondisi ini, *stress* tegangan yang ada pada isolasi minyak belum terlalu tinggi sehingga yang terjadi hanya perubahan pada *streamer*. Pada Gambar 4.12 dibawah dapat dilihat bahwa semakin lama kondisi *streamer* yang terbentuk semakin terlihat. Hal ini dikarenakan pemberian tegangan yang konstan pada waktu yang cukup lama dapat menyebabkan adanya perkembangan pada *streamer* yang menunjukkan bahwa terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* yang terjadi sesaat sebelum terjadi kegagalan isolasi (*breakdown voltage*).



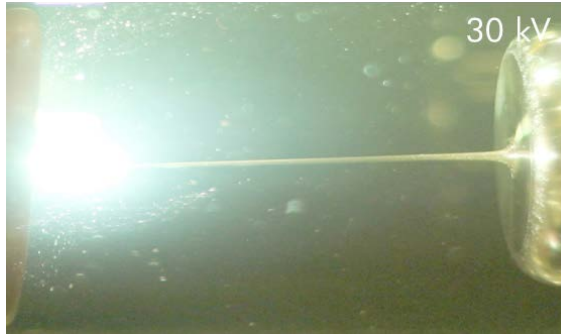
(a)



(b)

Gambar 4.12 Perubahan kondisi minyak pada tegangan pembangkitan sebesar 28 kV (a). perkembangan *streamer* yang semakin jelas (b). perkembangan *streamer* dan tersebarnya arah *streamer*.

Selang beberapa detik setelah adanya perkembangan *streamer*, ternyata terjadi kegagalan atau *breakdown voltage*. Sehingga tegangan pembangkitan yang diberikan secara konstan lebih baik dalam pengujian untuk mengetahui fenomena *pre-breakdown voltage* pada media isolasi minyak. Namun hasil dari pengamatan tidak ditemui adanya gelembung udara dibandingkan dengan pengujian sebelumnya. Sehingga adanya *breakdown voltage* dengan tegangan pembangkitan tetap tidak dapat terlihat adanya gelembung. Gambar 4.13 dibawah ini merupakan kondoso minyak saat terjadi *breakdown voltage*.



Gambar 4.13 Kondisi minyak saat terjadi *breakdown voltage*

4.2 Karakteristik Arus Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* pada Media Isolasi Minyak

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian *breakdown voltage* dengan tujuan untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak. Karakteristik yang didapatkan dari pengujian ini berupa akuisisi data yang terekam oleh LabVIEW dan representasi berupa gambar yang terekam oleh kamera. Minyak yang digunakan untuk pengujian adalah minyak trafo Shell Diala B.

Apabila suatu bahan isolasi diberikan tegangan maka akan terjadi perpindahan elektron-elektron dari satu molekul ke molekul lainnya. Apabila tegangan diberikan secara kontinyu dan bahan isolasi tidak mampu menahan tegangan yang terlalu tinggi hingga menimbulkan adanya *stress* tegangan pada isolasi tersebut maka timbul arus konduksi atau arus bocor.

Sesuai dengan pengujian *breakdown voltage* yang telah dilakukan pada minyak tersebut, didapatkan hasil bahwa Shell Diala B mengalami *breakdown voltage* pada tegangan 30kV DC. Data arus pada Tabel 4.1 dibawah ini direkam pada saat nilai tegangan sebesar 26kV DC hingga 30kV DC. Dari data arus yang dihasilkan menunjukkan bahwa terlihat adanya arus yang sesaat sebelum terjadinya *breakdown voltage*. Hal ini menunjukkan adanya arus konduksi yang dihantarkan oleh isolasi minyak tersebut. Adanya arus konduksi tersebut menunjukkan pula adanya fenomena *pre-breakdown voltage*.

Hasil pengujian tersaji pada tabel 4.1 dibawah ini. Nilai hasil pengujian yang tersaji pada tabel dibawah ini hanya dicuplik beberapa

kondisi saja ketika bentuk sinyak menunjukkan adanya arus yang terekam.

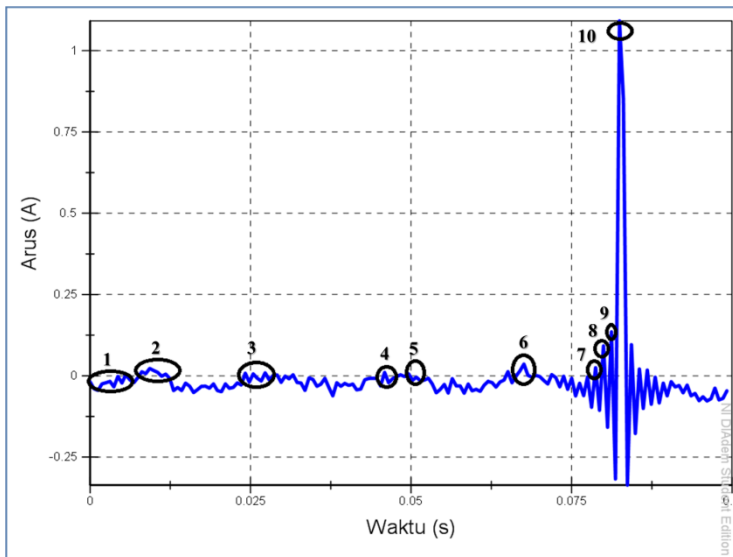
Tabel 4.1 Hasil Pengujian

Tegangan Terbangkit (kV)	Arus Terukur (mA)	Keterangan
26	0	Sebelum <i>breakdown</i>
26	16,3	Sebelum <i>breakdown</i>
26	22,6	Sebelum <i>breakdown</i>
28	0	Sebelum <i>breakdown</i>
28	32,2	Sebelum <i>breakdown</i>
28	7,8	Sebelum <i>breakdown</i>
28	5,9	Sebelum <i>breakdown</i>
28	9,14124	Sebelum <i>breakdown</i>
28	2,74686	Sebelum <i>breakdown</i>
28	-1,01454	Sebelum <i>breakdown</i>
28	10,26966	Sebelum <i>breakdown</i>
28	-52,35765	Sebelum <i>breakdown</i>
28	25,127	Sebelum <i>breakdown</i>
28	36,22332	Sebelum <i>breakdown</i>
28	92,08011	Sebelum <i>breakdown</i>
28	-158,42913	Sebelum <i>breakdown</i>
28	135,14814	Sebelum <i>breakdown</i>
30	-317,34828	Sebelum <i>breakdown</i>
30	1091,86023	Saat terjadi <i>breakdown</i>
30	-336,34335	Setelah <i>breakdown</i>
28	96,02958	Setelah <i>breakdown</i>
28	20,98965	Setelah <i>breakdown</i>

Dari Tabel 4.1 menunjukkan bahwa adanya perubahan arus yang terukur oleh peralatan akuisisi data yang disebut dengan arus konduksi. Data yang ditampilkan pada tabel diatas merupakan data hasil pencuplikan yang dilakukan pada saat pengolahan data. Data dari Tabel 4.1 disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.10.

Gambar 4.14 merupakan grafik arus hasil akuisisi data yang dilakukan pada pengujian ini. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kenaikan arus terjadi sesaat sebelum terjadinya *breakdown voltage*. Hal

ini menunjukkan adanya perpindahan elektron yang menyebabkan adanya arus konduksi sehingga menunjukkan terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage*. Dari data arus yang terukur pada alat akuisisi data akan di cocokkan dengan gambar yang terekam oleh kamera. Pada pengujian ini pengambilan sampel dari arus menyesuaikan dengan hasil foto yang terekam dalam 1 detik. Dibawah ini merupakan hasil pencocokan dari arus yang terukur dengan fenomena yang terjadi pada minyak Shell Diala B.



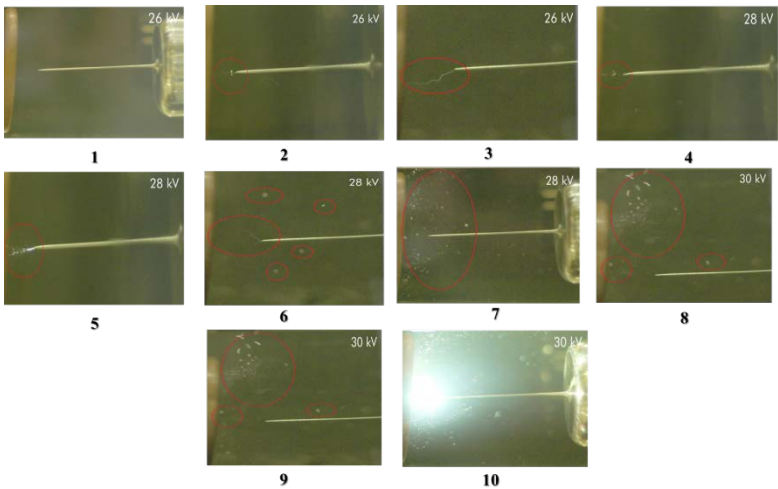
Gambar 4.14 Grafik arus hasil pengujian dengan nilai arus yang dicocokkan dengan hasil gambar

Pada Gambar 4.14, data arus berupa grafik telah diolah dan disesuaikan dengan fenomena yang terjadi pada minyak yang terekam oleh kamera. Pencocokan ini bertujuan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada minyak yang disertai dengan adanya perubahan arus pada alat ukur. Gambar 4.15 dibawah merupakan hasil gambar yang terekam yang telah dicocokkan dengan data arus sehingga diketahui bentuk fenomena yang terjadi ketika adanya perubahan nilai arus yang terukur pada alat akuisisi data. Tabel 4.2 dibawah ini merupakan tabel

yang menyajikan nilai arus yang terukur pada kondisi yang telah disesuaikan guna proses pencocokan.

Tabel 4.2 Arus yang terukur ketika minyak dalam kondisi perubahan

Kondisi	Tegangan Pembangkitan (kV)	Arus Terukur (mA)
1	26	0
2	26	16.3
3	26	22.6
4	28	52.35
5	28	36.22
6	28	92.08
7	28	158.42
8	30	135.14
9	30	317.34
10	30	1009.86



Gambar 4.15 Terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak yang dicocokkan dengan arus yang terukur

Pada Gambar 4.15 menjelaskan urutan terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage*. Dari penjelasan data diatas dapat diketahui bahwa fenomena *pre-breakdown voltage* dapat terjadi dan diamati pada media isolasi minyak dengan menggunakan elektroda jarum-plat. Sehingga

dengan diketahuinya fenomena ini, kegagalan pada isolasi minyak dapat dideteksi sejak awal sebelum terjadinya kegagalan yang sebenarnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari eksperimen *pre-breakdown voltage* pada media isolasi minyak adalah sebagai berikut:

1. Kenaikan nilai tegangan pembangkitan pada pengujian ini menentukan besar nilai arus yang terukur pada alat akuisisi data.
2. Perubahan kondisi minyak pada saat pengujian menunjukkan bahwa adanya fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak.
3. Gelembung yang terdapat pada minyak saat melakukan pengujian menunjukkan bahwa akan terjadi kegagalan isolasi minyak.
4. Nilai rata-rata terjadinya fenomena *pre-breakdown* sesuai dengan pengujian yang dilakukan terjadi pada tegangan pembangkitan 28 kV dengan arus yang terukur dalam rentang 100 – 150 mA.
5. Proses terjadinya *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak merupakan suatu fenomena yang terjadi sesaat sebelum terjadinya *breakdown voltage* dan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat.

5.2 Saran

Eksperimen selanjutnya dapat dilakukan menggunakan alat perekam gambar otomatis dan media isolasi yang berbeda dan dilakukan sinkronisasi data.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar,A., 2001. Teknik Tegangan Tinggi, Pradnya Paramita, Jakarta.
- [2] T. V. Oommen, “Vegetable oils for liquid-filled transformers,” IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 18, No. 1, pp. 6-11, 2002.
- [3] S. Lindren, “Environmentally acceptable transformer fluids, “ in Technical Progress, Report 1000438, EPRI, 2000.
- [4] D. Cherry, “Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers,” ABB Report, 2009.
- [5] Ershov A.P, kuperstokh A.L;”Flucuation Model of Liquid Dielectrics Breakdown with incomplete Charge Relaxation” Proceedings of the 11th Interational Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids ICDL pp 194-198, 1993 Baden-Dattwil, Switzerland.
- [6] A. Beroual, Hendry B.H. Sitorus, Rudy Setiabudy, and Setijo Bismo, “Pre-breakdown Phenomena in New Vegetable Oil-based Jatropa Curcas Seeds as Substitute of Mineral Oil in High Voltage Equipment,” IEEE Transcations on Dielectric and Electrical Insulation Vol. 22, No. 5, October 2015.
- [7] Negara, I Made Yulistya. 2013. Teknik Tegangan Tinggi Prinsip dan Aplikasi Praktis. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [8] Wijaya, I Made Indra. 2010. Karakteristik Korona dan Tegangan Tembus Isolasi Minyak pada Konfigurasi Elektroda Jarum-Plat. Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember .
- [9] Kuffel,E ; Zaengl WS ; Kuffel J , 2000. High Voltage Engineering Fundamentals Second Edition, Newnes, Oxford.
- [10] Naidu M.S. dan Kamaraju V, 2002. High Voltage Engineering Third Edition, Mc. Graw Hill, Boston

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Dwi Krisna Cahyaningrum lahir di Madiun pada tanggal 06 Agustus 1994. Anak kedua dari 2 bersaudara ini menempuh pendidikan dasar di SDN Teguhan 02 pada tahun 2000-2006, melanjutkan ke SMPN 6 Madiun pada tahun 2006-2009, dan lulus dari SMAN 1 Madiun pada tahun 2012. Pada tahun 2012, penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah penulis aktif di UKM Sepakola ITS sebagai Kepala Divisi Futsal Putri periode 2013-2014 dan sebagai Bendahara UKM periode 2014-2015. Selain itu, penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi periode 2015-2016. Penulis dapat dihubungi pada alamat *email* dwikrisna.cahya@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan